

定向钻井技术引领 聚焦深地深海探测

——勘探技术所“十三五”科技创新回顾及“十四五”业务展望

冉恒谦, 梁健*, 梁楠, 薛倩冰, 马莎莎

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

摘要: 全面总结了地质科学院勘探技术研究所“十三五”期间在定向钻井技术及仪器、深部钻探技术与装备、海洋钻探技术与装备等方面取得的重要成果, 主要包括: 创新突破定向水平井钻井及中靶技术, 助力海域天然气水合物第二轮试采实现了从“探索性试采”向“试验性试采”的重大跨越; 牵头实施完成“松科二井”重大科学钻探工程, 实现了理论、技术、工程、装备的重大突破; 成功研发了首套国产深海井口吸力锚, 解决了深海浅软地层井口支撑力不足的难题。同时, 分析了目前存在的问题, 并结合当前所面临的挑战, 对“十四五”期间的业务发展进行了展望。

关键词: 钻探工程; “十三五”; “十四五”; 定向钻井; 深地探测; 深海探测; 勘探技术所

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)01-0007-08

Directional drilling technology takes lead with focus on deep earth and deep sea exploration

—Review of science and technology innovation by Institute of Exploration Techniques, CAGS during the 13th Five-Year Plan and an outlook to the 14th Five-Year Plan

RAN Hengqian, LIANG Jian*, LIANG Nan, XUE Qianbing, MA Shasha

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: This paper comprehensively summarizes the important achievements made by Institute of Exploration Techniques, CAGS on directional drilling technology and survey tools, deep drilling technology and equipment,

收稿日期: 2020-12-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.01.003

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“松辽盆地资源与环境深部钻探示范”(编号: 12120113017600)、“松辽盆地资源与环境深部钻探工程(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20160209)、“土耳其卡赞贝帕扎里天然碱矿探采方法技术合作”(编号: DD2019090602)、“神狐海域天然气水合物先导试验区试采实施(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20190227)、“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号: DD20190585)、“十二五”国家高技术研究发展计划(863计划)“4000米地质岩心钻探成套技术装备”(编号: 2014AA06A607); 国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”(编号: 2018YFC0603400); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)重大专项团队项目“天然气水合物钻采船单筒双井及大洋钻探技术研究”(编号: GML2019ZD0504)、“新型无隔水管闭路循环钻井技术研究”(编号: GML2019ZD0501); 广东省重点领域研发计划项目“海域天然气水合物随钻测井和钻采井口稳定关键技术及装备研发”(编号: 2020B1111030003); 国家自然科学基金项目“高温环境下铝合金钻杆磨损失效及防护机制研究”(编号: 51404217)、“科学超深井铝合金钻杆的腐蚀防护机制研究”(编号: 41772390)

作者简介: 冉恒谦, 男, 汉族, 1963年生, 副所长, 教授级高级工程师, 探矿工程专业, 博士, 中国地质学会第十届探矿工程专业委员会副主任委员, 《钻探工程》期刊编委会委员, 主要从事科研项目管理及清洁能源钻探技术研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, 13803221648@139.com。

通信作者: 梁健, 男, 汉族, 1980年生, 科技处副处长, 教授级高级工程师, 地质工程、机械工程专业, 博士研究生, 中国地质学会第十届探矿工程专业委员会委员、副秘书长, 中国地质学会第五届青年工作委员会委员, 《钻探工程》期刊青年编委会主任委员, 从事深部钻探工程的科研与管理, 河北省廊坊市金光道77号, raul9942718@163.com。

引用格式: 冉恒谦, 梁健, 梁楠, 等. 定向钻井技术引领 聚焦深地深海探测——勘探技术所“十三五”科技创新回顾及“十四五”业务展望[J]. 钻探工程, 2021, 48(1): 7-14.

RAN Hengqian, LIANG Jian, LIANG Nan, et al. Directional drilling technology takes lead with focus on deep earth and deep sea exploration—Review of science and technology innovation by Institute of Exploration Techniques, CAGS during the 13th Five-Year Plan and an outlook to the 14th Five-Year Plan[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 7-14.

offshore drilling technology and equipment during the 13th Five-Year Plan. These achievements mainly include innovations in directional drilling and well intersection technology which has helped the second-round offshore natural gas hydrate production test realizing a leap from “exploratory production test” to “trial production test”; organization and implementation of Well SK-2 scientific drilling project where significant breakthroughs have been made on theory, technology, engineering and equipment; development of the first domestic deep sea wellhead suction anchor which has solved the insufficient support problem with the wellhead in deep sea shallow soft stratum. Moreover, this paper also analyses the existing problems and challenges with an outlook made on the institute’s future research activities in the coming 14th Five-Year Plan.

Key words: exploration engineering; the 13th Five-Year Plan; the 14th Five-Year Plan; directional drilling; deep earth exploration; deep sea exploration; Institute of Exploration Techniques, CAGS

0 引言

中国地质科学院勘探技术研究所是自然资源部中国地质调查局直属正局级事业单位,中国地质学会探矿工程专业委员会挂靠单位,行业期刊《钻探工程》(原《探矿工程(岩土钻掘工程)》)主办单位。主要开展地质钻探基础理论、前沿技术与装备设备研发,承担深部探测、能源资源勘探开发、海洋调查等重点前沿领域的地质调查钻探任务与工程示范,开展钻探科技成果转化与推广应用,支撑生态文明建设,服务现代矿业发展,开展成果、资料和社会公益性服务。“十三五”期间,勘探技术所面向国家能源资源等重大需求,采取多方举措提升科技创新能力,明确科技成果转化目标任务和工作重点,加快推动科技成果转化为现实生产

力,科技创新和科技成果转化方面双翼展翅,在定向钻井技术及仪器、深部钻探技术与装备、海洋钻探技术与装备等重点研究领域取得了较好的成果,为建设世界一流的地质调查局做出了应有的贡献。

1 “十三五”科技创新回顾

1.1 定向钻井技术及仪器

2016年至今,依托高精度定向钻井中靶导向技术——“慧磁”中靶系统,开发出多井组对接技术,实施了土耳其贝帕扎里5期的46个三井组对接井、6期的33个三井组对接井和卡赞1~3期天然碱对接井采矿工程的99个三井组对接井^[1-6],见图1;2019年,开展了美国帝国资源水溶采矿的定向对接井技术咨询服务,见图2。



图1 土耳其卡赞天然碱矿

Fig.1 Kazan trona mine in Turkey

2016年,扩展了高精度定向钻井中靶导向技术应用领域,应用于青海木里陆域天然气水合物试采工程,提出的小直径水平定向穿越地下水合物层的对接井钻探技术,达成多井连通水合物试开采^[7],实现了钻探效率高、开采效率高、技术成本低的技术创新,在我国陆域天然气水合物试采中首次应用,见图3和图4。

2020年,创新升级了第四代“慧磁”中靶系统

(见图5),系统采用了低噪版传感器,通过增强磁信号、干扰波过滤和电路重组等多种手段,将探测距离增加了30%,对接精度 ≤ 100 mm,磁信标正常工作时间可达25 d,助力海域天然气水合物第二轮试采实现了从“探索性试采”向“试验性试采”的重大跨越,为下一步的水合物多井汇聚连通试采创造了前提条件。



图2 美国定向对接井技术服务

Fig.2 Directional drilling services in US

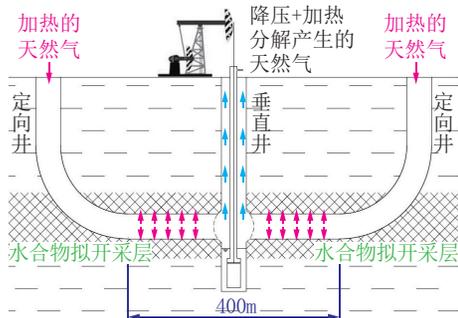


图3 水平对接井试采原理

Fig.3 Trial-producing with the horizontal intersected well set



图4 青海木里试采点火

Fig.4 Trial-producing and gas flaring in Muli, Qinghai

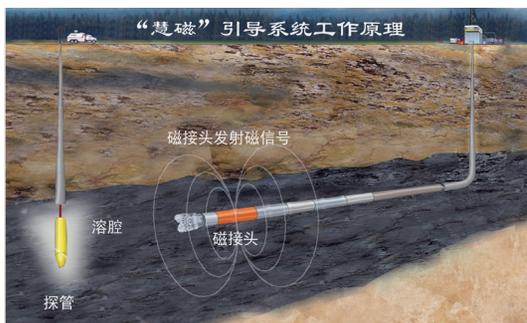


图5 “慧磁”中靶系统原理

Fig.5 SmartMag ranging system

1.2 深部钻探技术与装备

2018年,牵头实施完成了“松科二井”重大科学钻探工程(见图6),完钻深度为7018 m,是亚洲国家实施的最深大陆科学钻井,是国际大陆科学钻探计划(ICDP)组织成立22年来实施最深的钻井^[8-9]。其中,大口径同径取心与长钻程取心技术已创下多项世界纪录,即311 mm大口径连续取心最长1650 m、3种不同口径(311、216、152 mm)单回次取心最长(30、41、33 m)、高温钻井液技术创造了我国241℃最高井温应用纪录^[10],KT系列取心钻具、涡轮钻取心技术、大口径绳索取心技术及铝合金钻杆技术等系列研究成果为后续的万米特深科学钻井提供技术储备,实现了理论、技术、工程、装备的重大突破。



图6 松科二井

Fig.6 Well SK-2

2019年,完善了KT系列取心钻具及其应用技术(见图7),开拓技术市场、拓展应用领域,在新疆克拉玛依玛湖区块的风险探井玛页1井进行了取心

技术服务,再创216 mm口径单回次取心进尺世界新纪录(回次取心41.97 m);同时,创造新疆地区连续取心最长纪录(连续取心445.58 m,岩心采取率97.96%),设计取心工期125 d,仅用工期61 d,即用48.8%的时间完成了162%的取心工作量。



图7 KT系列取心钻具

Fig.7 KT series coring tools

2018年,国家高技术研究发展计划(863计划)“4000米地质岩心钻探成套技术装备”课题通过技术验收,创新研发了4000 m交流变频电驱动地质岩心钻机和系列钻具等,初步创建适合我国技术特点的、具有自主知识产权的小直径特深孔绳索取心钻进技术体系,并助力京津冀及雄安新区地热资源调查钻探工程,见图8。



图8 地热资源调查钻探工程

Fig.8 Geothermal resources survey drilling project

2018年,牵头并联合国内9家单位,成功申报了“十三五”国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”。项目从构建大深度绳索取心钻孔口径系列入手,开展了复杂地层钻进智能控制、地质岩心钻机关键技术研究及装备研

制、大深度高性能薄壁绳索取心钻杆研制、小口径高效系列钻具研究、环保冲洗液体系与废浆处理技术、钻探技术装备集成与示范等研究。拟突破智能控制、高效钻进、轻量化与模块化等关键技术^[11-22],见图9。2020年11月,项目通过中期评审验收。



图9 钻探设备机具联调联试

Fig.9 Combined test run of drilling equipment

1.3 海洋钻探技术与装备

2018年至今,开展了深海钻探钻杆柱组合、膨胀套管护壁及事故处理工艺、硬岩取心钻进和连续取心工艺等关键技术研究,攻关无隔水管泥浆循环系统、钻井重返位系统、岩心处理系统等关键设备^[23-28](见图10),协助广州海洋地质调查局开展大洋钻探船设计与建造工作,为深海地质调查和大洋科学钻探支撑提供了必要的工程技术手段。

2019年,针对浅软地层造斜率低的难题,创新性提出大弯角、高垫块、超短螺杆马达造斜钻具组合,探索出了一套定向钻进、扩孔钻进、动力导向下管施工工艺,大幅度提升软弱地层的造斜能力和造斜稳定性,探索出了海域水合物浅软地层大直径高效造斜的钻具组合和成井工艺,为第二轮水合物试采水平井方案设计提供了关键依据和关键钻井技术,引领了深海浅软地层水平井钻井技术。

2019年,成功研制了国内首套深海井口吸力锚技术装备(直径6.5 m、高12 m、重96 t,承载力 ≥ 5000 kN),联合攻关团队结合第二轮海域天然气水合物试采工程的具体需求,创新解决了吸力锚结构形式、姿态监控方式和安装工艺等关键技术(垂直

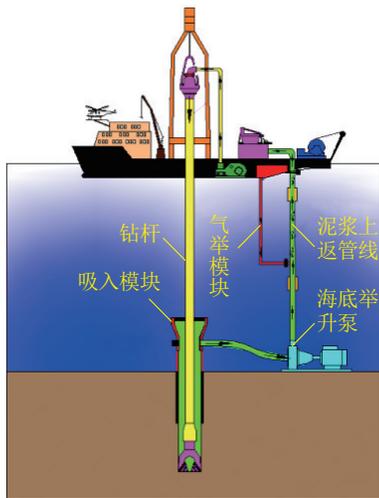


图10 无隔水管泥浆循环系统示意

Fig.10 Schematic diagram of riserless mud circulation

精度 $<1^\circ$),成功研发了首套国产深海井口吸力锚(见图11),解决了深海浅软地层井口支撑力不足的难题,使我国成为拥有完全自主知识产权的深海井口吸力锚技术装备的国家。



图11 深海井口吸力锚

Fig.11 Deep sea wellhead suction anchor

1.4 其他钻探仪器装备研发情况

率先研发了钻柱防腐、耐磨、减磨硬质防护涂层技术,研制的基于表面纳米化/微弧氧化、超音速等离子喷涂的系列化防护涂层^[29-32],实现了钻柱可靠、高效、长寿命服役,确立了深部地质钻探钻柱组件防护涂层技术体系。

基于现有板阀或球阀保压取心钻具闭合成功率低,难以取得良好的保压效果,创新设计了天然气水合物保压取心钻具^[33-35],研制成功了绳索打捞式保压取心钻具,实现了绳索打捞方式获取原状岩心(样),并增强了取样钻具的保压性能,提高了钻

探工作效率。

通过泵量变化完成割心,创新研制了绳索强制取心钻具,进一步扩大了绳索取心钻进工艺的地层适用性,有效保证了多金属矿复杂地层的岩心采取质量,提升了绳索取心工艺在复杂地层的使用效率及可靠性,为深孔复杂地层取心提供了新的技术思路。

针对现有小直径膨胀波纹管技术现存弊端,开发了一种通过液压系统驱动,可实现膨胀锥头直径连续变化,使波纹膨胀管护壁膨胀后直径不小于原钻孔直径的地质钻探波纹膨胀管护壁工艺技术与器具。

创新研发了一种组合中空井底动力绳索取心钻进装置,采用中空回转马达、中空液动冲击器与取心内总成配合结构,实现了增加绳索取心钻进井底动力功率的目的,可大幅提高施工效率、扩大绳索取心钻进方法的应用范围。

2 目前存在问题的分析

2.1 技术服务能力和领域拓展不足

与新时代地质调查总体要求还存在较大差距与问题,依托原有地质钻探技术,支撑服务深部探测、海洋地质调查、能源地质调查等的技术与装备体系不够完善、能力不够强,且亟待拓展在生态地质调查与修复、绿色勘查等方面的应用性支撑。

2.2 科技创新和信息化建设能力不足

技术产品迭代升级慢,钻探理论发展和技术更新升级慢,影响科技创新速度和力度;检测测试与试制等设备较落后,且缺乏专用定制设备,影响科技创新的开展。信息化工作起步晚,投入少,钻探工程信息化程度低,影响钻探工程实施管理和决策水平的提高;缺乏钻探工程信息化转换成创新动能的机制。

2.3 成果转化与开拓市场难度越来越大

现有技术产品不具压倒性技术优势,且受限于成本与资质等因素,在石油钻井、煤田勘探等领域推广应用愈加困难;同时,地质勘查钻探准入门槛较低,加之市场萎缩严重,价格竞争异常激烈,资金回款压力大,新产品和技术推广应用难度大。

3 “十四五”业务展望

3.1 向地球深部进军亟需攻关特深科学钻探技术装备

拓展深部资源是国际矿产勘查趋势所在,我国

资源勘查也正向深部转移。深部资源环境勘查亟待构建万米以深科学钻探技术与装备(15000 m),完善地球深部探测技术体系^[36],形成地球深部探测国家战略科技力量,为创新深地科学提供工程技术支撑与保障。

3.2 深海探测亟需攻关全海域大洋科学钻探技术

海洋资源是人类可持续发展不可或缺的重要领域,发展深海资源勘探技术,提升我国深海资源探测能力,自主创新深海井口吸力锚技术与装备、无隔水管钻探技术与装备、钻孔重返技术与装备等深水深井钻探关键技术,形成海域勘探开发技术体系,支撑深海科学国际前沿领域取得原创性突破,助力海洋强国建设。

3.3 加快推进海域天然气水合物试采和深部热能(干热岩)勘查亟需定向钻探提速增效

海域天然气水合物作为我国重要的战略资源,加快推进其提高产量、降低成本,实现商业化开采需要研制长距离超高精度中靶仪,攻关高强度造斜定向井和群井对接成井技术,为天然气水合物生产性试采及商业化开采提供工程技术和装备支撑^[37]。深部热能(干热岩)资源潜力巨大,低碳清洁、环境友好,可持续利用。深部热能开发利用需要攻关耐260℃高温泥浆、高精度井眼轨迹测控工艺与仪器、硬岩钻进工艺及配套机具、硬岩水力压裂等技术,为高温地热能钻采提供工程技术支撑。

3.4 川藏铁路等重大工程亟需水平定向钻探技术

川藏铁路是国家中长期建设规划的重大工程之一,是建设难度系数极高的铁路,沿线地质条件极其复杂,亟需攻关2000 m以深水平定向钻探技术、复杂地层取心技术与装备^[38],支撑解决川藏铁路活动构造与重大工程地质问题。

3.5 服务生态文明建设和支撑矿业转型发展亟需攻关绿色地质钻探技术、智能地质钻探技术装备和地质灾害防治技术

生态文明建设和矿业转型发展必须走绿色、低碳、可持续发展之路,在开发中保护,保护中开发。绿色勘查技术需要深化“绿色钻探、以钻代槽、一基多孔、一孔多支”钻探方法。智能地质钻探技术需要构建以绳索取心工艺为主体的智能化、模块化、轻量化钻探装备及配套的高效环保钻探工艺技术。地质灾害防治技术需要研发生态化自然格构加固、拦挡等空气钻进技术等。

4 结语

勘探技术所将瞄准国家重大需求,依托地质调查总体布局和转型发展新结构,充分发挥既有优势,加大科技创新和技术研发力度,推进成果转化应用,建立与新时代地质调查工作相适应的地质技术研发与应用学科体系和人才队伍,打造世界一流的地质调查钻探核心支撑力量。并将努力成为定向对接井钻探的世界领跑者,深部科学钻探和海洋地质钻探工程实施的主力军,深部能源钻采工程的重要力量。

参考文献(References):

- [1] 刘海翔,刘春生,胡汉月,等.土耳其天然碱矿水平对接井水溶开采技术回顾[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):7-13.
LIU Haixiang, LIU Chunsheng, HU Hanyue, et al. Review on trona solution mining with intersected well sets in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):7-13.
- [2] 刘汪威,涂运中,刘海翔,等.土耳其卡赞碱矿对接井水溶开采技术创新综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):14-23.
LIU Wangwei, TU Yunzhong, LIU Haixiang, et al. Review on innovative techniques for solution mining with intersected well sets at Kazan Trona Mine in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):14-23.
- [3] 刘春生,陈晓林,侯岳,等.方位伽马随钻测量技术在土耳其天然碱溶采对接井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):28-34.
LIU Chunsheng, CHEN Xiaolin, HOU Yue, et al. Application of azimuthal gamma MWD technology in trona solution mining with intersected well in Turkey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):28-34.
- [4] 张新刚,涂运中,刘汪威,等.多分支水平对接井技术在土耳其天然碱溶采中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):43-49.
ZHANG Xingang, TU Yunzhong, LIU Wangwei, et al. Application of multi-lateral horizontal intersected well drilling technique in Turkish trona solution mining[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(8):43-49.
- [5] 刘汪威,刘海翔,涂运中,等.天然碱矿综合钻井水溶开采工艺设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):1-6.
LIU Wangwei, LIU Haixiang, TU Yunzhong, et al. Comprehensive borehole solution mining design for trona mines[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(12):1-6.
- [6] 涂运中,陈剑垚,刘春生,等.“慧磁”定向钻井中靶系统超高精度中靶技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):

- 1-6,12.
TU Yunzhong, CHEN Jianyao, LIU Chunsheng, et al. Study on ultra-high precision target-hitting technology of SmartMag system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(10):1-6,12.
- [7] 李鑫森,张永勤,尹浩,等.水平对接井技术在天然气水合物试采中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):13-17.
LI Xinmiao, ZHANG Yongqin, YIN Hao, et al. Application of drilling technology of horizontally butted well for gas hydrate trial-producing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(8):13-17.
- [8] 中国地质学会2018年度十大地质科技进展[J].地质论评,2019,65(2):430,437.
Top "The 10 Geoscientific Achievements" of Geological Society of China in 2018[J]. Geological Review, 2019,65(2):430,437.
- [9] 2018年探矿工程十大新闻[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):1-4.
2018 top 10 sei-tech news in exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):1-4.
- [10] 许洁,朱永宜,乌效鸣,等.松科二井取心钻进高温钻井液技术[J].中国地质,2019,46(5):1184-1192.
XU Jie, ZHU Yongyi, WU Xiaoming, et al. High-temperature core drilling fluid technology of Well Songke-2[J]. Geology in China, 2019,46(5):1184-1192.
- [11] 张金昌,刘凡柏,黄洪波,等.5000米智能地质钻探技术与装备研发[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):1-8.
ZHANG Jinchang, LIU Fanbai, HUANG Hongbo, et al. Research and development of 5000m intelligent geological drilling technology and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):1-8.
- [12] 沈怀浦,何磊,黄洪波,等.适用于大深度地质钻探和油气地热钻井的双动力电顶驱系统设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):31-39.
SHEN Huaipu, HE Lei, HUANG Hongbo, et al. Dual-power electric top drive drilling system design for large-depth geological drilling and hydrocarbon & geothermal drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):31-39.
- [13] 高鹏举,董耀,刘凡柏,等.5000米地质岩心钻机主绞车设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):40-45.
GAO Pengju, DONG Yao, LIU Fanbai, et al. Design of the draw work of 5000m geological core drilling rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):40-45.
- [14] 任启伟,刘凡柏,高鹏举,等.5000米绳索取心绞车设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):46-52,57.
REN Qiwei, LIU Fanbai, GAO Pengju, et al. Design of 5000m wireline coring winch [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):46-52,57.
- [15] 欧阳志强,贺建波,石卫民,等.5000米智能地质钻探配套泥浆泵的方案设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):53-57.
OUYANG Zhiqiang, HE Jianbo, SHI Weimin, et al. Conceptual design of the mud pump for 5000m intelligent geological drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):53-57.
- [16] 尹浩,梁健,孙建华,等.地质特深孔绳索取心钻杆机械性能研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):58-64.
YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua, et al. Research on mechanical properties of wireline drill pipes for geological ultra-deep holes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):58-64.
- [17] 梁健,尹浩,孙建华,等.高强度耐热铝合金钻杆材料优选[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):65-71.
LIANG Jian, YIN Hao, SUN Jianhua, et al. Optimization of high strength and heat resistant aluminum alloy drill rod material [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):65-71.
- [18] 张翔,周琴,张蔚,等.小口径涡轮钻具减速器非对称齿轮弯曲强度分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):80-86.
ZHANG Xiang, ZHOU Qin, ZHANG Wei, et al. Bending strength analysis for the asymmetrical gear of the small diameter turbo drill reducer[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):80-86.
- [19] 柴麟,张凯,张耀澎,等.小直径垂钻工具推力执行机构性能测试[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):87-93.
CHAI Lin, ZHANG Kai, ZHANG Yaopeng, et al. Performance test of the pushing actuator of the small diameter vertical drilling tool[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):87-93.
- [20] 陈西,沈立娜,杨甘生,等.陶瓷空心微球对孕镶金刚石钻头胎体性能的影响研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):101-105.
CHEN Xi, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Effect of ceramic hollow microspheres on the performance of impregnated diamond bits[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):101-105.
- [21] 范海鹏,吴敏,曹卫华,等.基于钻进状态监测的智能工况识别[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):106-113.
FAN Haipeng, WU Min, CAO Weihua, et al. Intelligent drilling mode identification based on drilling state monitoring while drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):106-113.
- [22] 付帆,陶士先,李晓东.绿色勘查高温环保冲洗液研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):129-133.
FU Fan, TAO Shixian, LI Xiaodong. Research on environment-friendly high-temperature drilling fluid for green exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):129-133.
- [23] 朱芝同,刘晓林,田烈余,等.大洋钻探重入钻孔技术与系统发

- 展应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):8-15.
- ZHU Zhitong, LIU Xiaolin, TIAN Lieyu, et al. Development and application of the reentry drilling technology and system in ocean drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(7):8-15.
- [24] 秦如雷,许本冲,王嘉瑞.海洋钻井钻柱升沉补偿系统分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):22-27.
- QIN Rulei, XU Benchong, WANG Jiarui. Analysis of drill string compensation system for offshore drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(1):22-27.
- [25] 王志刚,胡志兴,李小洋,等.水力喷射微小井眼技术用于海域水合物钻探的可行性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):30-35.
- WANG Zhigang, HU Zhixing, LI Xiaoyang, et al. Feasibility of application of hydraulic jet micro-borehole technology to marine hydrate drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(2):30-35.
- [26] 王偲,谢文卫,张伟,等.RMR技术在海域天然气水合物钻探中的适应性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):17-23.
- WANG Cai, XIE Wenwei, ZHANG Wei, et al. Adaptability of RMR for marine gas hydrate drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(2):17-23.
- [27] 熊亮,谢文卫,卢秋平,等.我国深海钻探重入钻孔技术优选及设计思路[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):1-7.
- XIONG Liang, XIE Wenwei, LU Qiuping, et al. Optimization and design approach for deep-sea drilling well reentry technology in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(7):1-7.
- [28] 熊亮,谢文卫,张伟,等.跟管钻进下套管技术在大洋钻探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):16-22,35.
- XIONG Liang, XIE Wenwei, ZHANG Wei, et al. Application of casing-while-drilling technology in ocean drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(7):16-22,35.
- [29] 梁健,岳文,孙建华,等.超声表面滚压处理铝合金钻杆的高温摩擦学性能[J].中国表面工程,2016,29(5):129-137.
- LIANG Jian, YUE Wen, SUN Jianhua, et al. High temperature tribological properties of aluminum alloy drill pipe processed by ultrasonic surface rolling[J]. China Surface Engineering, 2016,29(5):129-137.
- [30] 梁健,岳文,孙建华,等.超声波冷锻与阳极氧化处理铝合金钻杆摩擦学性能研究[J].地质与勘探,2016,52(3):576-583.
- LIANG Jian, YUE Wen, SUN Jianhua, et al. Study on the tribological properties of aluminum drill pipe under ultrasonic cold forging technology and anodic oxidation treatment [J]. Geology and Exploration, 2016,52(3):576-583.
- [31] 周永宽,康嘉杰,岳文,等.超音速火焰喷涂金属陶瓷复合涂层的耐磨性能研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):72-79.
- ZHOU Yongkuan, KANG Jiajie, YUE Wen, et al. Study on wear resistance of HVOF metal ceramic composite coating[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):72-79.
- [32] 梁健,顾艳红,杨远航,等.微弧氧化处理对铝合金钻杆与钢接头电偶腐蚀行为的影响[J].材料保护,2018,51(6):110-114.
- LIANG Jian, GU Yanhong, YANG Yuanhang, et al. Effects of micro-arc oxidation treatment on galvanic corrosion behavior between aluminum alloy drill pipe and steel joints[J]. Materials Protection, 2018,51(6):110-114.
- [33] 李小洋,李宽,王志刚,等.钻井利器故事之“保真取样钻具”[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):62-65,72.
- LI Xiaoyang, LI Kuan, WANG Zhigang, et al. The story of a drilling weapon-pressure core sampler [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(7): 62-65,72.
- [34] 李小洋,王汉宝,张永勤,等.海洋天然气水合物探测及取样钻具研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):47-51.
- LI Xiaoyang, WANG Hanbao, ZHANG Yongqin, et al. Development of marine gas-hydrate detection and drilling sampler [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):47-51.
- [35] 李小洋,李宽,梁健,等.海洋沉积地层多功能取样钻具研制[J].地质与勘探,2020,56(6):1266-1271.
- LI Xiaoyang, LI Kuan, LIANG Jiang, et al. Development of the mutiple-function drill tool for core sampling in marine development [J]. Geology and Exploration, 2020, 56 (6) : 1266-1271.
- [36] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业70年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1-31.
- WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, et al. The development and outlook of geological drilling engineering—To review the 70th anniversary of exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):1-31.
- [37] 叶建良,秦绪文,谢文卫,等.中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J].中国地质,2020,47(3):557-568.
- YE Jianliang, QIN Xuwen, XIE Wenwei, et al. Main progress of the second gas hydrate trial production in the South China Sea[J]. Geology in China, 2020,47(3):557-568.
- [38] 张恒春,刘广,吴纪修,等.川藏铁路3000 m水平定向钻井技术方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):1-6.
- ZHANG Hengchun, LIU Guang, WU Jixiu, et al. Technical plan for 3000m long horizontal directional drilling for Sichuan-Tibet Railway[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):1-6.

(编辑 荐 华)